第 38 卷第 9 期
2018 年 5 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.9
May,2018

DOI: 10.5846/stxb201702280320
刘文茹,陈国庆,刘恩科,居辉,刘勤.基于 DSSAT 模型的长江中下游冬小麦潜在产量模拟研究.生态学报,2018,38(9):3219-3229.
Liu W R, Chen G Q, Liu E K,Ju H, Liu Q.The variations in winter wheat potential yields in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the RCP scenarios.Acta Ecologica Sinica,2018,38(9):3219-3229.

基于 DSSAT 模型的长江中下游冬小麦潜在产量模拟研究

刘文茹[1],陈国庆[1],刘恩科[2],居　辉[2],刘　勤[2,*]
1 山东农业大学农学院,泰安　271018
2 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京　100081

摘要:为了探明气候变化对长江中下游地区冬小麦潜在产量的影响,基于政府间气候变化专门委员会(IPCC)AR5 提出的 BCC-CSM1-1(Beijing Climate Center Climate System Model version1-1)气候系统模式输出的基于典型浓度 RCP 各情景(基准时段 baseline、RCP 2.6、RCP 4.5 和 RCP 8.5)主要气象要素的逐日模拟数据和历史观测数据。通过 DSSAT 模型模拟历史时期(2001—2009 年)冬小麦的物候期和产量,并计算模拟数据与实测数据二者的均方根误差和一致性指数(开花、成熟期和产量模拟结果的相对均方差根误差分别在 0.83%—2.98%之间和 7%以下,符合度 D 均接近于 1)明确最优遗传参数,应用最优参数模拟加以验证,完成模型参数区域化。结合历史阶段(1961—1990 年)和未来时期(2021—2050 年)主要气象要素变化趋势,利用 DSSAT 模型模拟分析未来 30 年长江中下游地区气候变化对小麦产量的影响及变化趋势,以期为未来作物生产提供理论依据。结果表明,DSSAT-CERES-Wheat 品种遗传参数本地化后能准确模拟冬小麦的生长发育过程及产量潜力。较基准年相比,2021—2050 年 RCP 情景下,冬小麦生育期内≥10℃积温除 RCP 2.6 情景外呈现逐渐增加趋势,增加幅度为 RCP 8.5>RCP 2.6>RCP 4.5;降水量年际波动都比较大,区域性差异明显;太阳总辐射量较基准年均有所降低,但降低的幅度随着年份的增加逐渐减小,变化率均呈现显著或极显著的增加趋势。除昆山外冬小麦开花期、成熟期较基准年均有所提前,开花期到成熟期天数则随之缩短。仅考虑气候条件时,长江中下游地区冬小麦产量潜力与基准年减少,昆山、英山下降幅度较滁州、钟祥大(3%—59%),且区域差异明显。分析可得,一定范围内冬小麦产量随积温的增加逐渐增加,超过一定阈值时则逐渐减少,其他气候因子增加或减少并不能弥补积温过低产生的负效应。

关键词:冬小麦;潜在产量;DSSAT;典型浓度;长江中下游地区

The variations in winter wheat potential yields in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the RCP scenarios

LIU Wenru[1], CHEN Guoqing[1], LIU Enke[2],JU Hui[2], LIU Qin[2,*]
1 *Agronomy College, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*
2 *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing* 100081, *China*

Abstract: The purpose of this study was to evaluate the effects of climate change on the potential yield of winter wheat in the middle-lower Yangtze area. Based on the BCC-CSM1-1 (Beijing Climate Center Climate System Model version1-1) climate system model proposed by the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) AR5, and historical daily meteorological elements were obtained under different RCP scenarios (baseline, RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5). In our study, which used the DSSAT-GLUE module, the phenotype and yield of winter wheat for the historical

基金项目:国家自然科学基金项目(41401510);中国农业科学院创新工程(2017-2020)
收稿日期:2017-02-28;　**网络出版日期:**2018-01-26
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liuqin02@ caas.cn

period (2001—2009) was used to optimize parameters and test the model performance. The performance of the parameters and model was evaluated by the normalized root mean squared error (NRMSE) and the consistency index (D). Then the wheat yield over the next 30 years was predicted by DSSAT, and its change trends were analyzed using meteorological elements recorded between 1961 and 1990 and future predictions (2021—2050). After parameter optimization, the NRMSE for flowering duration and maturity duration ranged from 0.83% to 2.98%, and the NRMSE for yield was below 7%. Climate change will have negative effects on future agricultural production and food security. The results showed that under the RCP2.6 scenario, accumulative temperature (>10℃) decreased significantly compared to the baseline climatic condition, but increased in the other two scenarios. The precipitation fluctuation was relatively large with obvious regional differences and an insignificant change rate. The total solar radiation in the three RCP scenarios was lower than the baseline, whereas the rate decreased as the number of years increased. Simulated accumulative temperature (> 10℃), precipitation, and solar total radiation during the growing period 2021—2050 compared to the baseline climatic condition had different change tendencies. When only the climate factors were taken into account (without considering CO_2 concentration effect, variety substitution, soil change, and management optimization), the growth period and yield of winter wheat had different change tendencies. In the RCP2.6 scenario, except for Kunshan, the flowering and maturing stages for winter wheat were delayed (RCP8.5>RCP4.5), and the days from flowering to maturity decreased. In general, there was a significant difference in regional trends for potential yield: Kunshan and Yingshan declined more than Chuzhou and Zhongxiang (3%—59%); yield reduction in Kunshan was lowest under the RCP2.6 scenario; but Chuzhou, Yingshan, and Zhongxiang were the opposite. These results indicated that winter wheat yield increased gradually with the increase in accumulated temperature, which in turn decreased as a certain threshold was exceeded. Furthermore, the increase or decrease in other climatic factors could not compensate for the negative effects of low accumulated temperatures. When the temperature was too high, flowering and maturity were delayed, which subsequently prolonged vegetative growth and blocked reproductive growth, which resulted in too many tillers and reduced the spike rates, thereby causing lower yields.

Key Words: winter wheat; potential yield; DSSAT; RCP (Representative Concentration Pathway); the middle and lower reaches of the Yangtze River

气候变化成为各国学者广泛关注的焦点问题,对各领域带来的影响都不容忽视。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一工作组第五次评估报告 AR5 指出:由自然影响因素和人为影响因素共同作用,全球气候变暖成为毋庸置疑的事实[1],自 1950 年以来,气候系统观测到诸多史无前例的变化。全球几乎所有地区都经历了升温过程,1880—2012 年全球平均温度已升高 0.65—1.06℃,未来地表温度可能持续增加[2]。农业是受气候变化较为敏感领域之一,中国是农业大国,人口众多,粮食安全问题仍然是当前的热点话题[3]。应对气候变化对我国粮食安全的威胁问题已成为必须面对的重大挑战[4]。小麦是世界主要粮食作物,长江中下游冬麦区是中国小麦主产区之一。气候变化背景下,长江中下游地区的气候和农业气候资源将发生显著变化,作物产量也将随之波动[5]。温度呈现增加的趋势变化,RCP8.5 情景比 RCP 4.5、RCP2.6 情景增温显著,特别是春、夏季增温最大[6-8];全国属长江中下游地区年日照时数降幅最多,参考作物蒸散量在全年减幅最大,呈现暖湿趋势[9]。年降水呈现出显著的增加趋势,年降水日数显著减少[10],但是春秋两季雨量占全年比例减小,而且未来冬小麦作物的气候生产潜力增加[11]。气候条件的改变将对作物生长发育和产量形成造成极为显著影响,而且还可能影响作物布局、种植制度和农技措施改变[12],从而导致农业生产不稳定性增加。因此气候变化对未来粮食作物生产的影响研究尤为重要。

近年来,未来气候变化情景与作物动态生长模型结合的评估方法已成为研究气候变化对农业生产影响的重要手段[13],DSSAT(Decision Support System for Agrotechnology Transfer)模型为主要研究工具,是目前使用最广泛作物模型系统之一[14]。DSSAT 4.6 模型综合数据模块、模型模块、分析模块和工具模块不仅给予数据支

持,还提供了计算和分析的方法。可系统预估未来作物的产量,并分析相应的影响因素,弥补栽培管理不足,既简化了农业生态系统进程的研究,又对未来农业决策提供了良好的工具[15-16]。国内外学者多用以模拟气候变化和灾害胁迫下作物产量影响及适应性策略制定、灌溉制度制定、最佳施肥量确定等方面的研究,包括利用 CERES-Wheat 模型研究得出气候变化将使小麦发育加快,生育期缩短,籽粒产量呈下降趋势,冬小麦平均减产 7%—8%[17],培育穗粒数较多的小麦新品种是抵抗未来气候变化对小麦产量影响的重要手段[18];应用 DSSAT 模型模拟指出美国萨斯州和俄克拉何马州地区随着二氧化碳、温度的升高,降水量的减少,未来作物籽粒产量将显著降低 30%—40%[19],加拿大地区当处于小麦最适温度时,二氧化碳的增加将会通过光合作用提高水分利用率,促进作物生长发育和产量的形成[14,20]。

以往诸多研究多集中于历史阶段 SRES 情景下全国范围或旱作区域研究气候变化对小麦产量影响,针对长江中下游地区研究也多以水稻为研究对象。应用作物模型结合未来气候情景模拟长江中下游地区未来小麦产量潜力进行定量描述和分析主要气象资源影响机理的研究尚少。因此,本文应用 RCP 各情景(baseline、RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5)输出的长江中下游地区主要气象要素的逐日模式模拟数据、逐日历史观测数据,尝试借助 DSSAT-GLUE 模型进行作物遗传参数的率定和和验证,探讨未来时期(2021—2050 年)冬小麦生产潜力变化特征,评价未来气候变化对作物产量的影响,为制定适应气候变化的对策等提供科学依据,对提高作物抗气候变化风险的能力具有重要的意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

长江中下游冬麦区是中国小麦主要产区之一,如图 1 所示,研究区域位于 27°33′—34°9′N、110°49′—122°30′E,北以秦岭淮河、黄淮冬麦区为界,南以南岭、武夷山脉与华南冬麦区相邻,西抵鄂西及湘西山地与西南冬麦区接壤,东至东海海滨[21],包括湖北、湖南、江西、浙江地区,江苏、安徽淮河以南及河南部分地区。苏、安徽及湖北是集中产麦区,全区地域辽阔,区位条件优越,地区地势西高东低,低山丘陵与平原相间分布,沿江沿海的双重地形优势(长江水系贯穿东西,东临黄海、东海)西起江汉平原,经洞庭、鄱阳两湖平原、沿江平原,东至江浙的太湖平原和沿海平原,湖泊众多(洞庭湖、鄱阳湖等)。本区属于北亚热带季风区,热量资源丰富,气候湿润,降雨充沛,小麦生育期间降水 340—960mm,降水分布不均衡。年平均气温 14—18℃之间,小麦生育期间太阳总辐射量为 193—226kJ/cm^2,≥0℃的积温 2000—2200℃,无霜期 210—270d。种植制度多为一年二熟,以稻-麦种植方式为主,少数地区稻-棉/杂粮轮作,气候变暖背景下稻麦轮作种植方式可能进一步扩大。稻麦周年轮作全区小麦适播期为 10 月下旬至 11 月中旬,成熟期北部 5 月底至 6 月中旬上旬。

1.2　数据来源

1.2.1　气象数据

本研究的气象模拟资料采用国家气象局提供的 BCC-CSM1-1 模式模拟的 baseline、RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5 情景下(RCP 4.5 和 RCP 6.0 均属于中等浓度排放路径,研究多应用 RCP 4.5,故本文未选用 RCP 6.0)的历史时期(1961—2010 年)和未来时段(2021—2050 年)0.5°×0.5°逐日格点降水量(mm)、最高气温(℃)、最低气温(℃)、太阳辐射量(MJ/m^2)等数据资料集,采用双线性插值法降尺度到长江中下游地区典型气象站点[22],典型站点依照以下原则:模拟站点应平均分布在研究区域内,不宜过于集中,具有区域代表性;选择管理数据记载整齐一致、完整全面。气象观测资料来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)中国地面数据资料日值集:包括降雨量(mm)、最高温度(℃)、最低温度(℃)、日照时数(h)并计算冬小麦生育期间≥10℃积温。由于模型数据格式要求需将日照时数按照国际公认的经验公式转变为总太阳辐射量,计算公式如下[23-25]

$$Q = Q_0\left(a + b\frac{n}{N}\right) \tag{1}$$

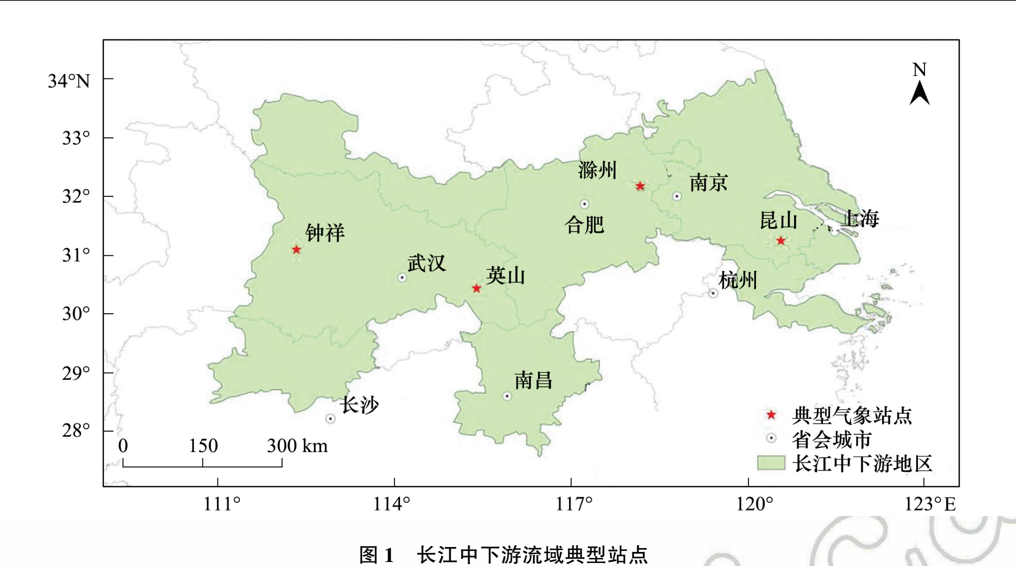


图 1 长江中下游流域典型站点

Fig.1 The typical website in the middle and lower Yangtze River Basin

$$Q_0 = \frac{TI_0}{\pi} \cdot \frac{1}{\rho}(\omega_0 \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\delta\omega_0) \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} = 1.0 + 0.033\cos(2.0\pi \times DAY/365) \quad (3)$$

$$N = \frac{24}{\pi}\arccos(-\tan\varphi\tan\delta) \quad (4)$$

式中,Q 为日总辐射量(KJ/cm^2);Q_0为日天文辐射量;a 和 b 为经验系数,长江中下游地区分别取 0.15 和 0.54[23];n 为日照时数(h);N 为最大时长。T 为周期 1440 分即;$I_0 = 13.167\times10^{-4}$MJ m^{-2} s^{-1}为太阳常数;DAY 为当日日序,1 月 1 日为 1,12 月 31 为 365 或 366;ω_0为日出时角;ρ 为日平地距离;δ 为太阳赤纬;φ 为地理纬度。

1.2.2 土壤数据

本文土壤数据来源于中国土壤数据库(http://vdb3.soil.csdb.cn/)数据集。根据 DSSAT-CERES-Wheat 需要数据包括土壤类型、剖面特征、土壤理化性质,即土壤名称、土壤颜色、土壤保水性能,土层层次及各层土壤质地(石砾、粉粒、黏粒所占百分比);有机碳(根据 Van Benmmelen 因数由有机质计算得)[26]、全氮、pH 值、阳离子交换量等。

1.2.3 栽培管理数据

本研究选用当地主要栽培品种为研究对象,收集整理昆山、滁州、英山和钟祥 4 个代表性站点的播种期、出苗期、开花期、成熟期、产量、灌溉内容(灌溉时期、灌溉量和灌溉方式)、施肥内容(施肥时间、施肥种类和施肥量)等栽培管理数据。

1.3 研究方法

1.3.1 作物模型

农业技术转移支持系统(DSSAT)是广泛使用作物生长动态模型,近年来在气候变化对作物生产影响不同管理水平对作物产量相应等方面应用较为广泛。

本文应用 DSSAT 4.6 模型作为主要研究工具,逐日模拟作物生长发育过程及产量。模型包括综合数据模块(主要依靠气象资料、土壤资料、栽培管理、遗传参数资料)、模型模块(模拟作物生长发育动态和产量等)、分析模块(可进行季节分析、轮作分析及空间分析)和工具模块不仅给予数据支持,还提供了计算、分析的方法。现阶段还不能应用到实际生产中,但是随着科技的进步和农业的发展 DSSAT 模型具有广阔的应用和发展前景[27],可系统的预测作物未来作物的产量,并分析相应的影响因素,弥补栽培管理不足,既简化了农业生

态系统进程的研究,又对未来农业决策提供了良好的工具[28-29]。

1.3.2　品种遗传参数率定

模型参数的本地化过程是提高模拟精确度的关键环节,精准的作物遗传参数更是保证预测结果可靠性的前提条件[30]。选择典型站点应用广泛且产量相对较稳定的代表性品种,并连续种植 2—5a 以上,部分年份数据用来调整作物遗传参数,另一部分用于模拟效果的评价。遗传参数调试创建天气、土壤、栽培管理、A 文件等[15]同时为了使模型正常运转,在未进行参数调整之前应假设一组遗传参数。DSSAT-GLUE 参数估计模块对冬小麦遗产参数进行率定,通过多轮 GLUE(Generalized likelihood uncertainty estimation)实现作物遗传参数的科学估计,第一轮总体参数估计,第二轮估计作物的物候期参数,第三轮估计作物生长参数。为了保证预估的准确性每轮 GLUE3000 次以上[31]。以表 1 数据为依据进行参数的调试,直至模拟值与实测值相吻合,既而实现模型本土化。在检验模型适用性时,应用均方根误差(RMSE)、均一化均方根误差(NRMSE)分析模型模拟误差,符合度(D)来判定模拟值与实测值的符合度,方法如下[32]:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\left[\left(\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{sim}_i - \mathrm{obs}_i)^2\right)/n\right]} \tag{5}$$

$$\mathrm{NRMSE} = \left[\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{sim}_i - \mathrm{obs}_i)^2/n\right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{sim}_i - \mathrm{obs}_i)^2/n}{\sum_{i=1}^{n} (|\mathrm{sim}_i - \overline{\mathrm{obs}_i}| + |\mathrm{obs}_i - \overline{\mathrm{obs}_i}|)^2}\right] 0 < D < 1 \tag{7}$$

式中,RMSE 为均方根误差;NRMSE 为均一化相对均方根误差;D 为符合度,sim_i 为第 i 个模拟值;obs_i 为第 i 个实测值;为观测值的平均值;n 为样本的数量。一般认为 NRMSE<10%为极好;10%<NRMSE<20%为好;20%<NRMSE<30%为中等;NRMSE>30%为差;D 值越接近 1 说明模拟值与实测值的一致性较好,反之则越差。

1.3.3　生育期和产量的模拟

本文根据长江中下游地区域地理位置和生态类型选择 4 个典型站点作为模拟试点。基于 RCP 情景下输出的历史时段(BAS)和未来时段(RCP)主要气象要素的逐日模式模拟数据,采用本地化后的品种遗传参数,假定土壤条件不变的情况下,设定相应的种植条件(例如,模拟前根据历史观测资料进行合理的选择播种期),利用 DSSAT 模型预测不同时段冬小麦生育期和产量变化趋势特征,便于分析模拟两个时段均利用模式模拟数据,均不考虑土壤肥力、栽培管理措施等因素的影响仅受气象条件影响的模拟分析。

2　结果与分析

2.1　冬小麦品种参数的调试与验证

本文基于典型站点(昆山 2002—2003 年、滁州 2005—2006 年、英山 2004—2005 年、钟祥 2001—2002 年)的观测数据、土壤、田间栽培管理数据分别对相应冬小麦品种(扬麦 11 号、扬麦 158、鄂麦 14 号、881)遗传参数进行逐一率定。由表 1 可见,作物遗传参数校准后开花期与成熟期的模拟结果的相对均方差根在 0.83%—2.98%,产量的均方根误差控制下 7%以下,符合度(D)均接近于 1,表明作物遗传参数准确度高,可较准确地反映当地品种遗传特征。

为了进一步验证作物遗传参数适用性,应用昆山 2004—2006 年、滁州 2007—2008 年、英山 2006—2009 年和钟祥 2003—2005 年相应品种冬小麦的开花期、成熟期与产量进行模拟,并通过模拟值与实测值的对比分析评价模拟效果。如图 2 所示,冬小麦开花期、成熟期日序和产量的模拟值与实测值的相对均方差根分别在 0.57%—2.81%、0.57%—2.81%和 4.68%—9.99%(均小于 10%),说明模拟效果较好。符合度 D 均在 0.72—0.99之间,说明模拟值与实测值吻合度较高,可模拟未来冬小麦生育期和产量,可信度较高。

2.2　气候模式模拟的未来气象要素变化

不同时段,三种典型情景下冬小麦生育期内≥10℃积温、降水量和太阳总辐射量较基准年变化区别较大。

表 1 各站点小麦品种参数及开花期、成熟期、产量的模拟值与实测值的比较分析

Table 1 Analysis comparison between observed and simulated values for variety parameters anthesis stage maturity stage and yield of winter wheat in selected four stations

站点 Station	主栽品种 Species	P1V/d	P1D/%	P5/(℃/d)	G1/(no/g)	G2/mg	G3/g	PHINT/(℃/d)	开花期 Anthesis NRMSE/%	开花期 Anthesis D	成熟期 Maturity NRMSE/%	成熟期 Maturity D	产量 Yield NRMSE/%	产量 Yield D
昆山	扬麦 11 号	23.0	75.1	539.8	18.0	26.6	1.9	60.0	1.71	0.82	0.89	0.83	6.83	0.82
滁州	扬麦 158	62.3	19.1	554.2	21.8	25.4	1.0	95.0	1.79	0.99	1.80	0.99	4.18	0.94
英山	鄂麦 14 号	8.9	94.5	690.7	17.1	37.6	1.3	60.0	0.90	0.97	1.30	0.89	2.50	0.83
钟祥	881	31.2	85.6	593.2	16.9	33.7	1.1	60.0	0.95	0.98	2.98	0.85	4.77	0.82

P1V:最适温度条件下通过春花阶段所需天数,Thermal time from seedling emergence to the end of the juvenile phase during which the plant is not responsive to changes in photoperiod;P1D:光周期参数,Extent to which development is delayed for each hour increase in photo period above the longest photoperiod at which development proceeds at a maximum rate;P5:籽粒灌浆期积温,Thermal time from silking to physiological maturity;G1:开花期单位株冠质量的籽粒数,Potential spikelet number coefficient as estimated from the number of spikelets of main culm dry weight at anthesis;G2:最佳条件下标准籽粒质量,Maximum possible number of kernels per plant;G3:成熟期非胁迫下单株茎穗标准干质量,Kernel-filling rate during the linear grain-filling stage and under optimum conditions;PHINT:完成一片叶生长所需积温,Phyllochron interval: the interval in thermal time between successive leaf tip appearances;NRMSE:归一化均方根误差,normalized root mean squared error;D:模拟值与实测值的符合程度,coincidence degree of distribution between simulated and measured value

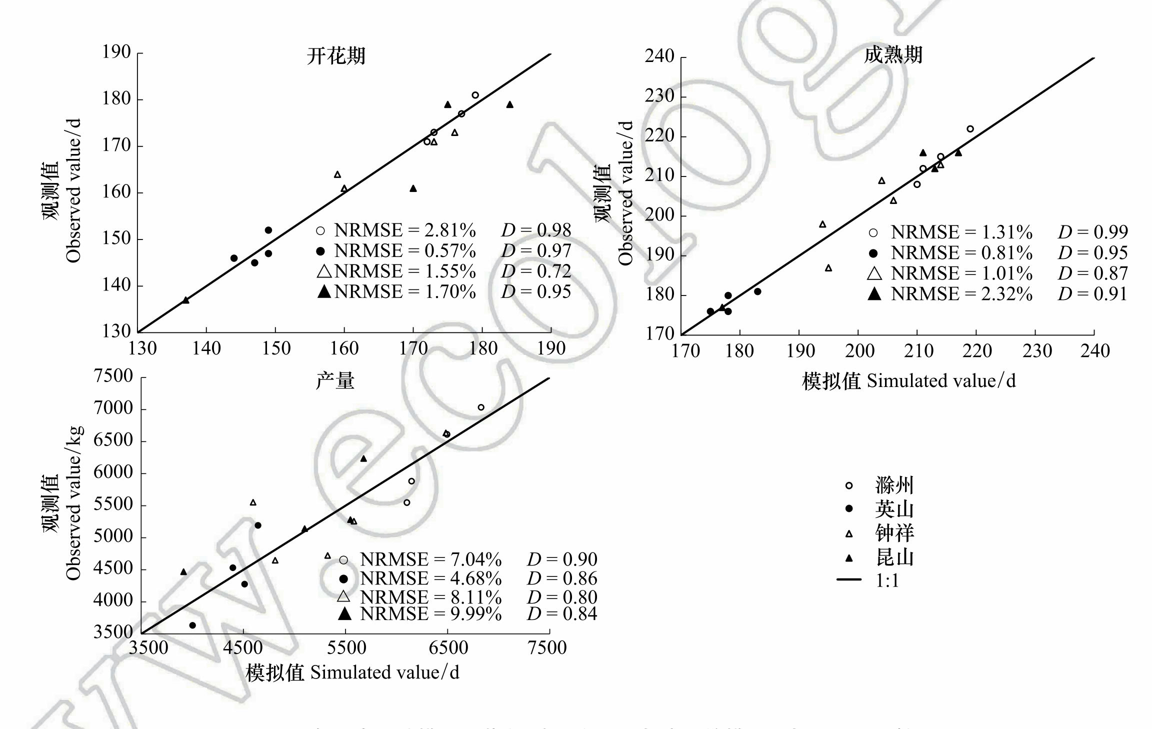


图 2 冬小麦品种模拟开花期、成熟期日序与产量的模拟值与实测值比较

Fig.2 Comparison of observed and simulated values duration of flowering and maturity stages and yields in winter wheat

NRMSE:归一化均方根误差,normalized root mean squared error;*D*:模拟值与实测值的符合程度,coincidence degree of distribution between simulated and measured value

由图 3 可知,RCP 2.6 情景下冬小麦生育期内≥10℃积温较基准时期表现出明显的下降趋势,变化幅度在-12%—-34%之间。RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景冬小麦生育期内≥10℃积温则均呈现逐增加趋势,且 2020—2030 年 RCP 4.5 情景增加幅度大于 RCP8.5,2030—2050 年则与之相反;降水量的年际波动都比较大,RCP 2.6、RCP 8.5 情景下降水量较基准时段比大部分年份表现为增加趋势,RCP 4.5 降水量较基准年大都减少;太阳总辐射量较基准年均有所降低,但降低的幅度随着年份的增加逐渐减小。RCP 2.6 降低幅度最小,而 RCP 4.5 和 RCP 8.5 降低幅度相对较大多处于 40%—52%,特别是 RCP 8.5 情景下降低幅度最大,最高年份可达 54 MJ m^2a^{-1}。

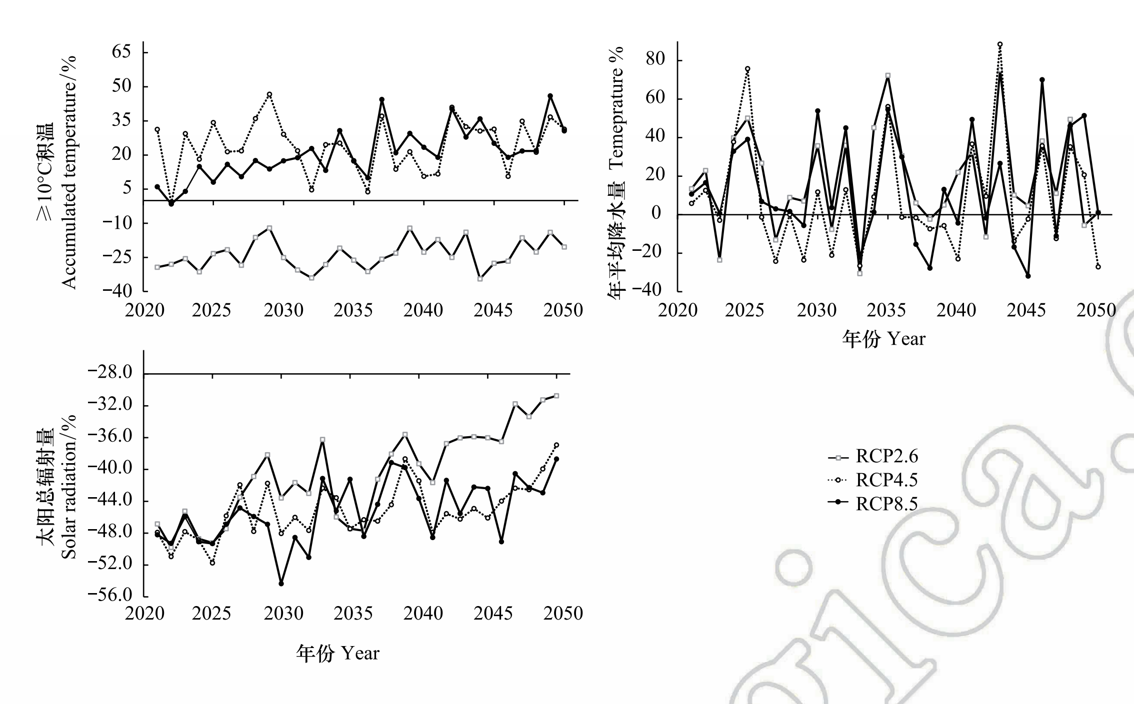


图 3　未来时段 3 种 RCP 情景主要气象要素较基准时段变化趋势

Fig.3　The variations of main meteorological elements under three RCP scenarios over the middle and lower Yangtze River during 2021—2050 compared with baseline

表 2 为长江中下游地区各典型站点主要气候资源及其变化率。基准时段,冬小麦生育期内太阳总辐射量在 5536—6496MJ m^2 a^{-1}以 7.6—11.8MJ m^2 a^{-1}($P<0.05$)的趋势逐渐减,降水区域差异较大,≥10℃积温滁州地区相对较低其他地区在 3573—3883℃之间。各典型浓度路径下英山、滁州、昆山、钟祥太阳总辐射量多呈现逐极显著的增加趋势,变化率则表现为随浓度路径增加逐渐增加,高端浓度路径最大增加速率可达到 30.0 MJ $m^{-2}a^{-1}$($P<0.01$)。降水量变化各异但变化趋势均不显著。高、低端浓度路径下冬小麦生育期内≥10℃积温的变化率分别以8.7—12.0℃/a和12.9—30.0℃/a的趋势显著或极显著的增加,稳定浓度路径(RCP4.5)≥

表 2　各站点未来典型浓度路径(RCP)情景下气象要素及变化率

Table 2　The main meteorological elements and its variations rate in scenarios

情景 Scenario	气象要素 Meteorological elements	英山 生育期内 Growthperiod/(×10^3)	英山 变化倾向率 Variations rate/a^{-1}	滁州 生育期内 Growthperiod/(×10^3)	滁州 变化倾向率 Variations rate/(a^{-1})	昆山 生育期内 Growthperiod/(×10^3)	昆山 变化倾向率 Variations rate/a^{-1}	钟祥 生育期内 Growthperiod/(×10^3)	钟祥 变化倾向率 Variations rate/a^{-1}
Baseline	SR/(MJ/m^2)	6.08	−8.9*	5.54	−11.8*	6.39	−7.6*	6.50	−9.5*
	AT/(℃)	2.88	5.2	2.29	2.9	2.57	1.0	2.73	5.7
	P/mm	1.13	2.1	0.48	0.9	0.81	−3.4	0.71	0.6
RCP2.6	SR/(MJ/m^2)	3.85	13.6**	3.28	12.7**	3.98	12.5**	3.99	13.7*
	AT/(℃)	1.82	8.7*	2.19	10.4**	2.68	12.0**	1.88	11.5**
	P/mm	0.72	3.6	0.80	2.2	0.91	1.3	0.99	2.8
RCP4.5	SR/(MJ/m^2)	2.85	17.1**	3.17	16.7**	2.98	16.8**	2.99	15.7**
	AT/℃	3.17	8.6	2.81	7.1*	2.93	7.6*	3.06	11.1
	P/mm	0.83	2.7	0.53	3.5	0.57	−3.6	0.54	0.7
RCP8.5	SR/(MJ/m^2)	2.79	19.8**	3.14	18.5**	2.96	19.7**	2.97	16.3**
	AT/℃	3.17	31.6**	3.00	12.9*	3.29	22.4**	3.16	30.0**
	P/mm	0.86	−3.9	0.52	4.1	0.56	−1.6	0.52	2.5

SR 代表太阳总辐射量,represents the total amount of solar radiation;AT≥10℃代表≥10℃积温,represents accumulated temperature above10℃;P 代表降水量,represents precipitation;* 代表 $P<0.05$,** 代表 $P<0.01$

10℃积温除昆山站外其他站点变化并不显著。总体而言未来各情景太阳总辐射量变化率与基准时段相反,均呈现显著或及显著的增加趋势,降水量的变化并不显著,冬小麦生育期内≥10℃积温变化率表现为 RCP 8.5>RCP 2.6>RCP 4.5 呈显著或极显著的增加趋势。

2.3 未来 30 年冬小麦物候期的变化趋势

在 DSSAT-CERES-wheat 模型中冬小麦开花期和成熟期是两个尤为重要的物候期,不同 RCP 情景下 2021—2050 年长江中下游地区冬小麦的开花、成熟期日序较基准年变化模拟结果(表 3、表 4)。由表可知,基准时段典型站点开花期和成熟期日序在 157—216d 和 190—244d 之间,开花到成熟所持续天数为 28—36d。RCP 2.6 情景下,除昆山冬小麦开花期和成熟期日序较基准年提前外其余均有所推迟,开花期到成熟期天数则有所增加。RCP 8.5 和 RCP 4.5 情景下较基准年均有所提前,那么开花期到成熟期天数则随之缩短。RCP 4.5 情景下,2021—2030 年冬小麦开花期日序和成熟期日序较基准年提前分别推迟了 8—12d 和 9—13d,较 2030—2050 年少 3—5d。

表 3 未来气候变化情景下冬小麦开花期日序较基准年变化

Table 3 Changes in winter wheat flowering duration (d) under future climate scenarios compared with baseline

站点 Station	BAS	RCP2.6/d			RCP4.5/d			RCP8.5/d		
		2030s	2040s	2050s	2030s	2040s	2050s	2030s	2040s	2050s
昆山	157	-6	-6	-4	-8	-9	-11	-6	-11	-13
滁州	187	5	0	4	-12	-11	-17	-7	-15	-17
英山	198	20	23	22	-9	-11	-13	-5	-16	-16
钟祥	216	21	19	19	-11	-12	-14	-4	-15	-15

BAS:历史阶段开花期日序,flowing period in baseline;“-”代表未来时段开花期较基准期提前;“+”代表未来时段开花期较基准期延后

表 4 未来气候变化情景下冬小麦成熟期日序较基准年变化

Table 4 Changes in winter wheat maturity duration (d) under future climate scenarios compared with baseline

站点 Station	BAS	RCP2.6/d			RCP4.5/d			RCP8.5/d		
		2030s	2040s	2050s	2030s	2040s	2050s	2030s	2040s	2050s
昆山	190	-2	-3	-2	-9	-11	-13	-7	-12	-15
滁州	223	8	4	7	-13	-12	-16	-8	-14	-18
英山	221	21	20	20	-10	-12	-13	-5	-16	-17
钟祥	244	19	16	17	-11	-13	-16	-5	-15	-16

BAS:历史阶段开花期日序,flowing period in baseline;“-”代表未来时段开花期较基准期提前;“+”代表未来时段开花期较基准期延后

2.4 未来典型浓度路径(RCP)情景下冬小麦产量变化趋势

图 4 为 RCP 情景下长江中下游地区 4 个典型站点 2021—2050 年冬小麦潜在产量变化。在不考虑 CO_2 浓度效应、品种差异和管理措施仅受气候变化影响的情况下,冬小麦潜在产量均呈现出下降趋势,下降幅度表现为 RCP 2.6>RCP 8.5>RCP 4.5。冬小麦产量较基准年相比区域差异明显,研究区域南部>北部(昆山、英山下降幅度较滁州、钟祥大 3%—59%。RCP 2.6 情景下,≥10℃积温较基准年下降幅度最大,较其他情景而言太阳总幅度量降低幅度最小,但是产量下降幅度较大(除昆山),表明太阳总辐射量增加并不能弥补积温的急剧减少造成负面影响。RCP 8.5 产量降低幅度大于 RCP 4.5≥10℃积温相差多 4℃—362℃之间,开花期和成熟期提前天数最多,说明一定范围内冬小麦产量随积温的增加逐渐增加,超过一定阈值时则逐渐减少。若积温、降雨量水平类似的情况下,太阳总辐射量较基准年降低幅度减小,冬小麦的产量变化幅度也随之减小,表明气候因子增加或减少并不能弥补积温过低产生的负效应,积温水平一致的情况下,产量降低幅度随太阳总辐射量减少幅度的增加而逐渐减小。

3 讨论

长江中下游属低纬度地区,沿江沿海,温度相对较高,降水充沛,太阳辐射总量相对较少,温度相对较高,

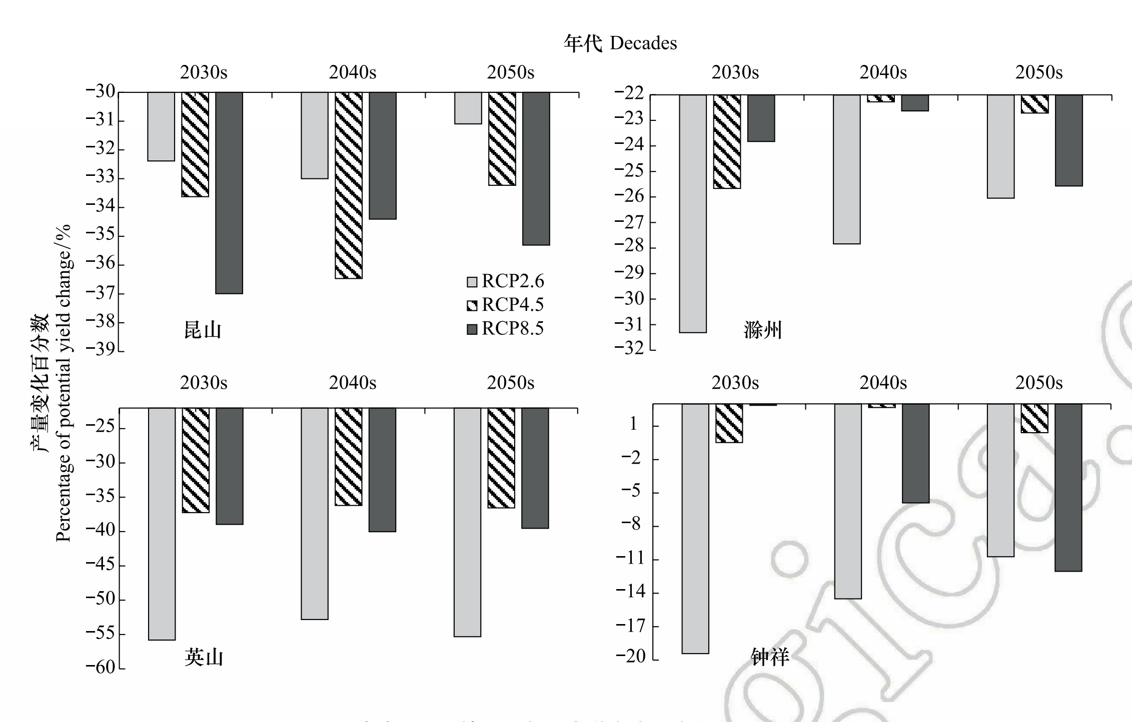


图 4　未来 RCPs 情景下冬小麦潜在产量变化(2021—2050)

Fig.4　Changes in potential yields of winter wheat under future climate scenarios compared with baseline

大部分地区均无灌溉习惯,区域降水条件能满足作物生育期内的水分需求。RCP 情景下未来降水量变化趋势并不显著,降水量对小麦的产量的影响较小[11]。≥10℃积温和太阳辐射量是冬小麦产量变化的主要影响因子,未来情景下持续增温,生育期内≥10℃积温也会随之增加。小麦属于低温长日照作物,必须经历一定的低温诱导才能开花结实,所以如果春化阶段温度过高,营养生长不良而抑制生殖生长影响和开花结实,或者春化作用提前。太阳总辐射量过高,提前成熟,造成干物质积累少,最终导致小麦开花期和成熟期有所推迟,产量潜力降低。SRES 情境下 A2、B2 模式全国温度、降水增加,2050s 小麦雨养产量降低 11.4%和 20.4%,长江中下游地区由于降水的增加小麦产量有上升趋势[33]。因此,本文只从气象的角度来探明由于气候资源的改变对未来冬小麦潜在产量的影响,作物产量变化幅度的差异因气候条件、品种和管理措施的不同而产生差异。针对小麦生育期缩短,产量降低问题,可通过推迟播期、培育穗粒数较大品种来降低气候变化带来的不利影响[4],为长江中下游冬小麦的生产提供理论依据和指导。

未来气候大背景下,CERES 系列模型已经在许多国家得到广泛的验证[18],本文考虑到区域差异性及品种适应性,选用 4 个代表性品种调试了适应各地区的品种遗传参数,结果表明 DSSAT 模型在长江中下游地区的模拟效果良好,模拟结果可信度较高;但是该模型包含了大量过程简化和半经验性质的参数,对病虫害、洪涝和极端天气事件等灾害性天气影响的研究并不突出,本文未考虑 CO_2 和 NO_3 的温室效应对作物生长的影响,本文对冬小麦的模拟存在不确定性。因此,未来产量潜力的模拟上有必要进一步考虑土壤、管理、品种更替,极端灾害和温室气体等方面进一步深入研究。若要应用到未来实际生产和优化管理应尝试建立多因子模拟分析,考虑各个因子的交互作用,增加实验年限和测定指标,以期模拟未来真实潜力,根据不同气候情景分析气候要素的变化趋势,并通过作物动态生长模型对气候要素影响对作物产量潜在影响进行模拟分析,制定科学合理的措施来应对。

4　结论

1)作物遗传参数率定后,模拟的开花、成熟期和产量与实测值的相对均方差根分别分在 0.83%—2.98%之间和 7%以下,符合度均接近于 1,表明作物遗传参数准确度高,调试的品种可较准确的进行模拟研究,结果

可信度较高。

2)2021—2050 年 RCP 情景下,冬小麦生育期内≥10℃积温、降水量和太阳总辐射量较基准年变化各异。除 RCP 2.6 情景外,≥10℃积温较基准年呈现逐渐增加,增加速率表现为 RCP 8.5>RCP 2.6>RCP 4.5;降水量年际波动都比较大,区域性差异明显,变化率未达到显著水平;太阳总辐射量较基准年均有所降低,但降低的幅度随着年份的增加逐渐减小,变化率均呈现显著或及显著的增加趋势。

3)DSSAT-CERES-wheat 模型模拟中,总体表现为,除昆山外冬小麦开花期、成熟期较基准年均有所提前,那么开花期到成熟期天数则随之缩短,且 RCP 8.5>RCP 4.5。

4)作物产量变化幅度的差异因气候条件、品种、管理措施的不同而产生差异,未来仅考虑气候资源的影响长江中下游地区冬小麦产量潜力与基准年减少(RCP 2.6>RCP 8.5>RCP 4.5),且区域差异明显。昆山、英山下降幅度较滁州和钟祥大,表明一定范围内冬小麦产量随积温的增加逐渐增加,超过一定阈值时则逐渐减少,其他气候因子增加或减少并不能弥补积温过低产生的负效应。若温度过高,开花、成熟期延迟,造成营养生长延长,生殖生长受阻,分蘖过多,成穗率减少导致产量降低。

参考文献(References):

[1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press, 2013.

[2] IPCC. Summary for policymakers//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[3] 居辉, 熊伟, 许吟隆, 林而达. 气候变化对我国小麦产量的影响. 作物学报, 2005, 31(10): 1340-1343.

[4] 袁静, 许吟隆. 基于 CERES 模型的临沂小麦生产的适应措施研究. 中国农业气象, 2008, 29(3): 251-255.

[5] 杨绚, 汤绪, 陈葆德, 田展, 赵思健. 利用 CMIP5 多模式集合模拟气候变化对中国小麦产量的影响. 中国农业科学, 2014, 47(15): 3009-3024.

[6] 刘文茹, 居辉, 陈国庆, 刘恩科, 刘勤. 典型浓度路径(RCP)情景下长江中下游地区气温变化预估. 中国农业气象, 2017, 38(2): 65-75.

[7] 徐颖, 丁一汇, 赵宗慈. 长江中下游地区 21 世纪气候变化情景预测. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 25-31.

[8] 曾小凡, 周建中, 翟建青, 苏布达, 熊明. 2011-2050 年长江流域气候变化预估问题的探讨. 气候变化研究进展, 2011, 7(2): 116-122.

[9] 杨晓光, 李勇, 代姝玮, 刘志娟, 王文峰. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 IX. 中国农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3177-3188.

[10] 梅伟, 杨修群. 我国长江中下游地区降水变化趋势分析. 南京大学学报: 自然科学, 2005, 41(6): 577-589.

[11] 刘文茹,陈国庆,曲春红,居辉,刘勤.RCP 情景下长江中下游麦稻二熟制气候生产潜力变化特征研究.生态学报,2018,38(01):1-11

[12] 张宇, 王石立, 王馥棠. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究. 应用气象学报, 2000, 11(3): 264-270.

[13] 杨沈斌, 申双和, 赵小艳, 赵艳霞, 许吟隆, 王主玉, 刘娟, 张玮玮. 气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响. 作物学报, 2010, 36(9): 1519-1528.

[14] 文新亚, 陈阜. 基于 DSSAT 模型模拟气候变化对不同品种冬小麦产量潜力的影响. 农业工程学报, 2011, 27(2): 74-79.

[15] Attia A, Rajan N, Xue Q, Nair S, Ibrahim A, Hays D. Application of DSSAT-CERES-Wheat model to simulate winter wheat response to irrigation management in the Texas High Plains. Agricultural Water Management,2016,(165): 50-60.

[16] 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述. 作物学报, 2003, 29(5): 750-758.

[17] 袁静. 气候变化对小麦生产的影响及适应措施分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.

[18] 杨轩, 王自奎, 曹铨, 张小明, 沈禹颖. 陇东地区几种旱作作物产量对降水与气温变化的响应. 农业工程学报, 2016, 32(9): 106-114.

[19] Tubiello F N, Rosenzweig C, Goldberg R A,Jagtap S, Jones J W. Effects of climate change on US crop production: simulation results using two different GCM scenarios. Part I: wheat, potato, maize, and citrus. Climate Research, 2002, 20(3): 259-270.

[20] Qian B D, De Jong R, Huffman T, Wang H, Yang J J. Projecting yield changes of spring wheat under future climate scenarios on the Canadian Prairies. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(3/4): 651-669.

[21] 王伟, 黄义德, 黄文江, 李存军, 王娴. 作物生长模型的适用性评价及冬小麦产量预测. 农业工程学报, 2010,26(3): 233-237.

[22] 陶苏林, 申双和, 李雨鸿, 高苹. 气候模拟数据订正方法在作物气候生产潜力预估中的应用——以江苏冬小麦为例. 中国农业气象, 2016, 37(2): 174-187.

[23] Almorox J, Hontoria C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9/10): 1529-1535.

[24] 卢燕宇, 田红, 鲁俊, 温华洋. 近 50 年安徽省太阳总辐射的时空变化特征. 气象科技, 2016,44(5): 769-775.

[25] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 胡维平. 太湖无锡地区太阳总辐射的气候学计算及特征分析. 应用气象学报, 2003, 14(3): 339-347.

[26] 周海军, 孙静萍, 崔敏, 团良, 白力军. 呼伦贝尔地区草原表层土壤中总有机碳与有机质初探. 中国环境监测, 2013, 29(5): 111-113.

[27] 罗毅, 郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题. 农业工程学报, 2008, 24(5): 307-312.

[28] 吴锦, 余福水, 陈仲新, 陈晋. 基于 EPIC 模型的冬小麦生长模拟参数全局敏感性分析. 农业工程学报, 2009, 25(7): 136-142.

[29] 刘海龙, 诸叶平, 李世娟, 杨靖一, 白由路. DSSAT 作物系统模型的发展与应用. 农业网络信息, 2011, (11): 5-12.

[30] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 刘健, 李毅, 吴淑芳, 冯浩, 何建强. 不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证. 农业工程学报, 2015, 31(12): 138-150.

[31] 姜志伟, 武雪萍, 华珞, 蔡典雄, 逄焕成, 吴会军. 洛阳孟津农业技术转移决策支持系统数据库组建. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2009, 30(3): 71-76.

[32] He J Q. Best Management Practice Development With the CERES-Maize Model for Sweet Corn Production in North Florida[D]. Gainesville: University of Florida, 2008.

[33] 熊伟, 居辉, 许吟隆, 林而达. 气候变化下我国小麦产量变化区域模拟研究. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 164-167.